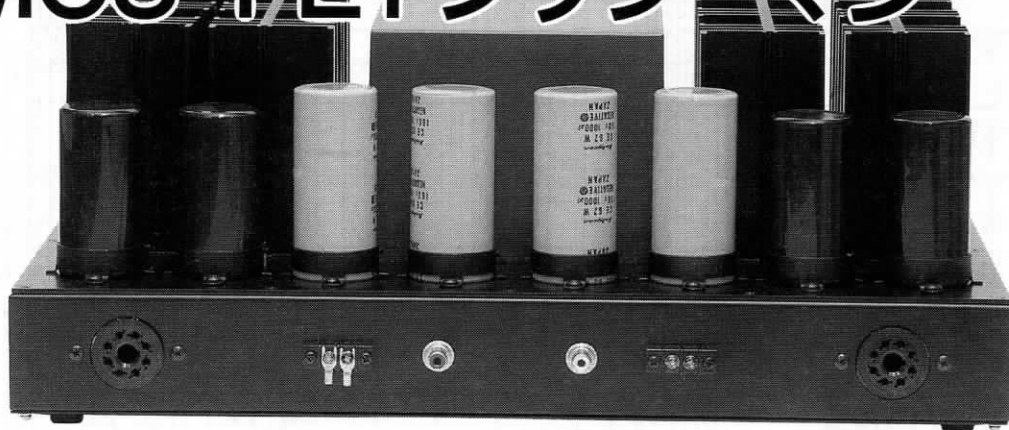
半導体素子で再現を試みる　<構想編>

MOS-FETフッターマン

OTLパワー・アンプの製作(2)

山崎　浩

フッターマンOTLは最も人気のある真空管式パワー・アンプの一つでしょう．電気的特性は際立って優れているとも思われませんが，多くのマニアはその音色に憧れているようです．フッターマンOTLの回路動作を踏まえ，高圧動作が可能な半導体素子で真空管を置き換えつつ，音色を大きく左右するパラメータとして出力インピーダンスに着目し，負帰還との関わりを検討するために半導体式フッターマンOTLを製作しました．第1図に増幅部回路を示します．

《出力素子について》

このアンプにおいて真空管を置き換えるのは，動作原理が真空管と同じ多数キャリア素子のパワーMOS-FETです．縦形パワーMOS-FETの出力特性は，フッターマンOTL出力段6 HB 5に似て，5極管特性を示します．

出力管6 HB 5を置き換えるパワーMOS-FETはSiemens社のBUZ 44*で，TO-3の金属パッケージです．BUZ 44のリニアリティを改善するために，ソース抵抗で電流帰還しました．ソース抵抗による電流帰還で6 HB 5の g_m (=9.1 mS)に一致させるには，計算上100 Ωです．しかし，100 Ωのソース抵抗によるデメリットは大き過ぎます．2 Ωを付加した場合の出力特性を第2図に示します．フルスケール0.8 A(=2.56 W，16 Ω時)のレンジですが，

パラメータ	6HB5	BUZ44	BUZ45	単位
耐圧	6,000	500	500	V
許容電力損失	18	78	125	W
順伝達係数	9.1m	2.5 (2Ωソース抵抗付 0.35)	4	S
入力容量	22	1,500	3,800	pF
出力容量	9	110	250	pF
オン抵抗	100	1.4	0.55	Ω
出力抵抗	11k	数10k以上	数10k以上	Ω

〈第1表〉パワー素子の主要パラメータ比較

〈第1図〉半導体式フッターマン OTL 増幅部

この状態で良しとしました．gfs は約 0.35，2 パラで 0.7 です．

放熱器にマウントした 2 パラ BUZ 44 の各ゲートに直付けの 22 Ω だけでは寄生発振するので，ゲートバイアス側を組み込んだプリント基板に 82 Ω を付加しました．なお，放熱器はシャーシ間に直付けでなく，シリコンゴムを介して固定します．シャーシに信号成分を流さないためです．

* 当初，BUZ 44 (PD＝78 W) よりチップサイズが 2.5 倍の BUZ 45 (PD＝125 W) の予定でした．入力容量はチップサイズにほぼ比例するから，高域の減衰を抑制するために BUZ 44 に変更しました．**第 1 表**に 6 HB 5，BUZ 44，BUA 45 の主要パラメータを抜粋し示します．

《出力段バイアス回路》

前月号のバイアス回路はやや不安定で調整し難いので変更しました．出力段パワー MOS-FET のゲートバイアス回路を**第 3 図**に示します．部品点数が多く複雑に見えますが，プリント基板に組み込むと，小さくまとまります．

上側のゲートバイアスは，出力段 B 2 電源から 100 kΩ を経由し，15 V のツェナーダイオードで安定化した後，20 kΩ のトリマーでゲート電位を可変し，出力段のアイドリング電流を調整します．20 kΩ のトリマーと中点間に挿入した 2 個のダイ

〈第2図〉ソース抵抗 2 Ω 付 BUZ 44 に出力特性

〈第5図〉正帰還の効果，出力段の平衡ドライブ（--×--）と非平衡（—●—）ドライブ

負荷抵抗をオリジナルの1 MΩから330 kΩへ，ソース抵抗を56 Ω+15 Ωから1 kΩに変更しました．ソース抵抗の変更に伴い，負帰還系の定数も**第1図**のように変更しました．ただし，NF 1のコンデンサは，同じ時定数とするための計算値(＝0.68 μF)より大きい4.7 μFとしました．

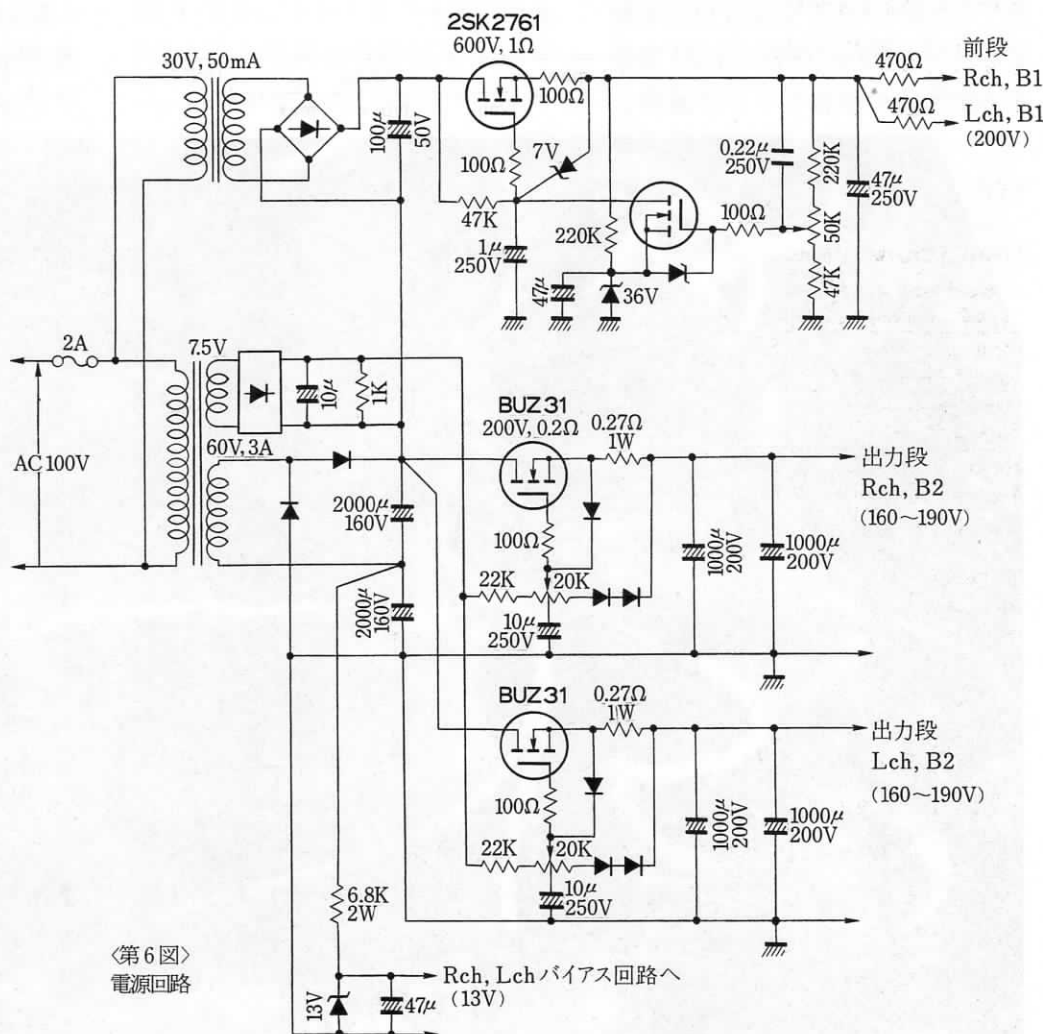
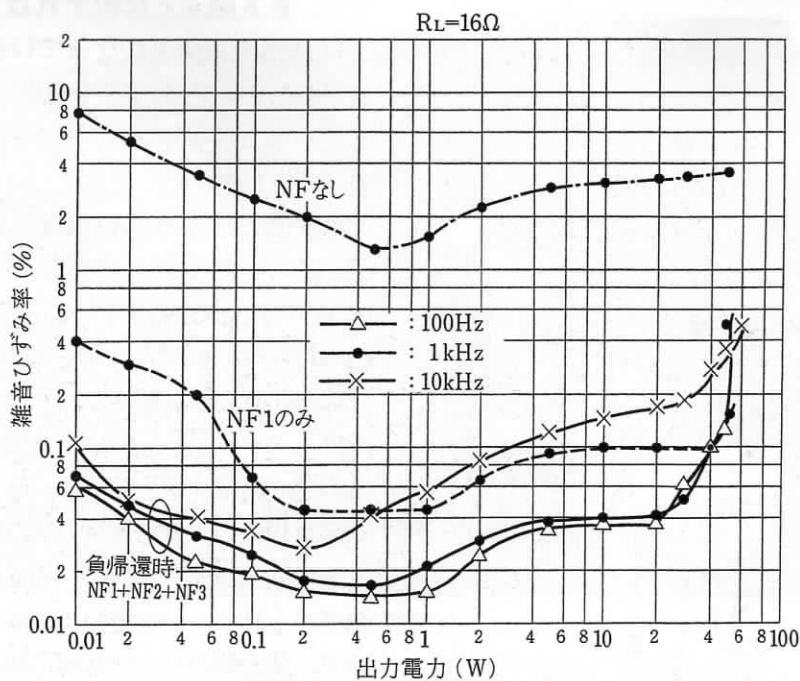
出力段と同様，定格より格段に少ないドレイン電流で動作させるので，温度補償しないことが不安でしたが，ソース抵抗(約10 kΩ)による電流帰還だけで十分でした．**第2表**にBSS 149のデータシートを抜粋し示します．

**デプリーション形は品種が少なく，手持ちのBSS 149に合わせたためです．

《電源回路》

フッターマンOTLオリジナルの電源部は感心しません．そもそも，ライン・オペレートのH-1型はACラインの一端がアンプのグランドに接続され，プリアンプを含む信号系全体が商用周波で変動してしまう極めて問題の多い方式です．グランド問題を解決するためか，H-3型では電源トランスを介してACラインから分離絶縁し，増幅部に電力を供給する通常の方式に改められています．

第6図に本アンプ電源部の全回路を示します．出力段に対し，トランスの2次側を倍電圧整流し，パワーMOS-FETによるリップルフィルターを介してDC 160〜190 Vを増幅部の出力段に供給します．オリジナルと同様，安定化していないので，最大出力時には160 Vに低下します．トランスの3次巻線（AC 7.5 V）を利用してDCパワー入力ラインに重畳し，パワーMOS-FETのドレインより高い電圧をゲートに与えれば，電圧ロスを小さくできます．20 kΩのトリマーで整流平滑コンデンサのリップル成分に等しい電圧ロスに調整します．電圧ロスが小さいので，発熱もわずかです．

〈第6図〉
電源回路

〈第9図〉ひずみ率特性

	本アンプ	40 KG 6 AOTL	801 A シングル	定電流アンプ
電圧ゲイン	32.8 dB	26.6 dB	28.1 dB	35.6 dB
負帰還量	38.1 dB	12.4 dB	0 dB	0.6 dB
出力インピーダンス	0.33 Ω	2 Ω	4 Ω	150 Ω
ピアノ	軽い	メリハリあり	同左	迫力あり
ドラムセット	軽い	低域バランス良	同左	迫力あり
フルート	やわらかい	同左	華やか	生々しい
トランペット	軽い	同左	華やか	高音うるさい
弦	自然	同左	やや派手	高音きつい
女性ボーカル	自然	ややあり厚み	同左	中音が貧弱

〈第3表〉試聴結果

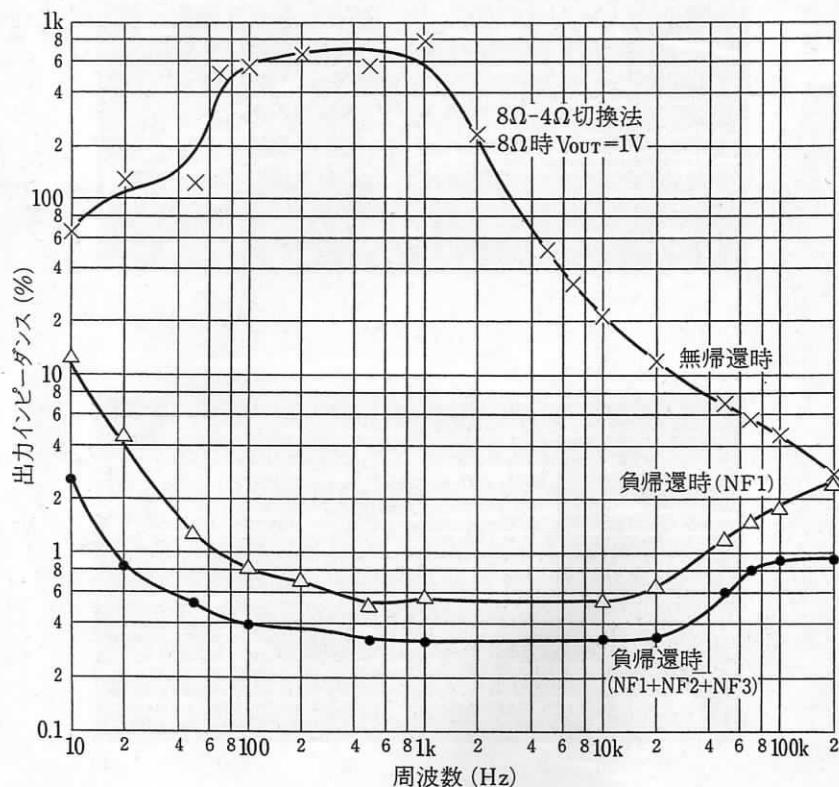
の中域では600 Ωと定電流アンプ並です.

オリジナルを踏まえた回路定数を選択しても，入力容量と順伝達係数が真空管に比べて2桁も大きいパワーMOS-FETで，果たしてフッターマンOTLを再現できるか不安でした（パワーMOS-FETに置き換えると,無帰還時のゲインは大きく,高域遮断周波数が低下する筈です）．フッターマンH-3に似た特性が得られたのは，負帰還回路（NF 1, NF 2, NF 3)の時定数をほぼ等しく選んだためと想像しています．

***森川忠勇氏によるH-3オリジナルの測定値（MJ誌，1996年5月号）．

《試聴と反省》

負帰還量による出力インピーダンスと音色との関係を確認することは，本アンプ製作の目的でした．しかし，フッターマンOTLは負帰還を前提に設計されています．とりあえず，本アンプも所定の負帰還を施して試聴しました．

先に製作した定電流ソース形定電流アンプ(2005年4月号)，40 KG 6 Aパラ OTLの5極管接続(2001年5月号）および私のリファレンスである武末氏設計801 A並列シング

〈第10図〉出力インピーダンス特性

ルのコピー（1996年2月号）とによる比較試聴結果を表3に示します．ソースは日本オーディオ協会製作のCD「IMPACT-2」，スピーカーは概略指定箱入りのロイーネDV 160を用いました．ただし，モノラルです．

定電流アンプが違い過ぎるので，他のアンプの差は圧縮されたようです．本アンプは40 KG 6 A OTLと似ていますが，軽く薄めの音色です．801 Aシングルと比べてメリハリがなく，定電流アンプの迫力はありません．現時点で半導体式フッターマンOTLの評価は芳しくありませんが，構想編の冒頭で述べた「半導体式OTLと真空管OTL，高帰還と無帰還による音色の違い」を出来上がったばかりの本アンプをベースに，じっくり追求するつもりです．

●OTLアンプ・シャーシうら全体